

Perancangan Kontroler *Neuro Fuzzy* Untuk Pengaturan Kecepatan Motor *Spindle* Pada CNC Jenis *Milling*

Mentari Madi Pertiwi, Ir. Joko Susila, M.T. dan Ir. Rusdhianto Effendi A. K., M.T.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: jokosus@ee.its.ac.id, ditto@ee.its.ac.id

Abstrak—Pada mesin CNC *milling* ketika proses *feeding* (pemakanan) berlangsung dalam pembentukan benda kerja, akan terjadi perubahan beban. Terjadinya perubahan beban tersebut akan mempengaruhi respon kecepatan *spindle*, sehingga dibutuhkan kontroler untuk menjaga kecepatan di sekitar nilai referensi yang ditentukan. Pada tugas akhir ini, digunakan kontroler cerdas *neuro fuzzy* supaya kecepatan *spindle* motor dapat mengikuti kecepatan referensi apabila terjadi perubahan beban. Dalam pengujian kontroler *neuro fuzzy* dengan *plant* motor pada kecepatan referensi 2500 rpm diperoleh *settling time* sebesar 5,68 detik dan *rise time* 6,29 detik. Pada beberapa kondisi pengujian dengan perubahan kecepatan referensi saat diturunkan dari 2500 rpm menjadi 2000 rpm, kecepatan motor dapat mengikuti kecepatan referensi dengan *settling time* sekitar 4,71 detik dan *rise time* sebesar 5,17 detik. Dan ketika kecepatan referensi dinaikkan dari 2500 menjadi 3000 rpm, kecepatan motor dapat mengikuti referensi dengan *settling time* sekitar 6,32 detik dan *rise time* sebesar 6,92 detik.

Kata Kunci—Mesin CNC *Milling*, Motor *Spindle*, *Neuro-Fuzzy*

I. PENDAHULUAN

Mesin CNC *milling* adalah mesin dimana pergerakan meja mesin (sumbu X dan Y) serta *spindle* dikendalikan oleh suatu program. Program tersebut berisi langkah-langkah perintah yang harus dijalankan oleh mesin CNC. Mesin *milling* merupakan suatu proses pemakanan benda kerja yang sayatannya dilakukan dengan menggunakan pahat yang diputar oleh poros motor *spindle*. Motor *spindle* merupakan bagian dari mesin yang menjadi rumah mata pahat. *Spindle* inilah yang mengatur putaran dan pergerakan pahat pada sumbu Z. *Spindle* inipun digerakkan oleh motor yang dilengkapi oleh transmisi berupa *belting* atau *kopling*. Dengan berkembangnya mesin CNC, maka semakin banyak pula benda kerja yang dapat dibuat karena cukup rumit membuat benda kerja yang presisi dan juga lamanya waktu pengerjaan produksi harus diperhatikan sehubungan dengan efisiensi pengerjaan. Hal-hal yang berkaitan dengan waktu pengerjaan salah satunya adalah kecepatan pemakanan, yang dimaksud disini adalah jarak tempuh gerak maju pisau atau benda kerja dalam satuan millimeter permenit. Besarnya kecepatan pemakanan dipengaruhi oleh jenis bahan pahat, jenis pekerjaan yang

dilakukan dan kedalaman pemakanan. Jenis pekerjaan dibagi menjadi dua yaitu, pekerjaan kasar dan pekerjaan penyelesaian. Pekerjaan kasar yang dimaksud adalah pekerjaan pendahuluan dimana pemotongan atau penyayatan benda kerja tidak diperlukan hasil yang halus dan presisi, sehingga kecepatan pemakanannya dapat dipilih angka yang besar. Semakin tebal penyayatan hendaknya semakin rendah putarannya untuk menjaga umur pahat dan tidak terjadi beban lebih terhadap motor penggerakannya. Sedangkan pekerjaan penyelesaian yang dimaksud adalah pekerjaan penyelesaian (*finishing*) akhir yang memerlukan kehalusan dan kepresisian ukuran tertentu, sehingga kecepatan pemakanannya harus menggunakan angka yang kecil dan tentunya harus menggunakan putaran mesin sesuai perhitungan atau data dari tabel kecepatan potong

Pada penelitian ini, mesin CNC diharapkan dapat beradaptasi dengan cepat terhadap beban kecepatan yang berubah-ubah. Metode pembebanan yang dilakukan adalah dengan memberikan kecepatan gerak potong (*feedrate*) yang berbeda-beda pada setiap benda kerja. Perubahan kecepatan gerak potong tersebut diperlukan untuk mengetahui respon sistem ketika mesin CNC membentuk pola pada benda kerja dengan kedalaman tertentu. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan metode kontrol yang dapat beradaptasi dengan perubahan beban yang diberikan. Kontroler yang dipilih untuk mengatasi masalah pembebanan pada mesin CNC ini adalah kontroler *neuro fuzzy*. Kontroler *neuro fuzzy* dipilih karena untuk memperbaiki respon kecepatan dari motor *spindle* sehingga kecepatan motor tetap konstan sesuai dengan kecepatan referensi yang diberikan pada saat terjadi perubahan beban maupun tidak terjadi perubahan beban.

II. TEORI PENUNJANG

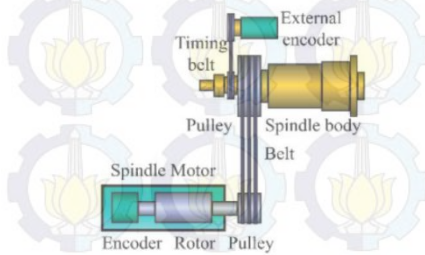
A. Mesin CNC

Istilah CNC digunakan untuk mesin yang bekerja dengan cara memahat (*feeding*) sebuah *solid material* menjadi suatu objek tertentu. Berdasarkan arsitektur dan cara kerja CNC dibagi menjadi dua, yaitu CNC *milling* (giling) dan CNC *lathe* (bubut). Pada CNC *milling* posisi material adalah diam dan dipahat oleh pisau yang berputar (*spindle*), sedangkan pada CNC *lathe*, material diposisikan berputar dan dipahat oleh pisau yang diam. Dalam melakukan kerja CNC menggunakan bahasa pemrograman tertentu yang berguna memberikan perintah kepada mesin untuk melakukan kerja guna mendapatkan objek kerja yang diinginkan, bahasa pemrograman tersebut disebut dengan *G-Code file* atau *NC-file*. Bahasa pemrograman tersebut

berisi perintah untuk mengaktifkan koordinat, kecepatan, mekanik mesin dan lain sebagainya[5].

1. Spindle

Spindle adalah perangkat mesin yang bekerja dengan cara memutar pisau pahat (*milling cutter*) untuk memahat sebuah benda menjadi objek yang kita inginkan.



Gambar 1. Struktur Spindle[1]

Struktur *spindle* dapat diamati pada gambar 1, dimana *spindle* terdiri atas motor *spindle* dan perangkat transmisi. Rotasi motor *spindle* ditransmisikan ke poros *spindle body* melalui sebuah sabuk, dari transmisi tersebut dapat diketahui bahwa rasio kecepatan bergantung pada rasio ukuran katrol antara katrol dan *spindle body*[1].

Spindle harus memiliki *velocity feedback device* untuk mengukur kecepatan yang dihasilkan ketika melakukan proses pemahatan, komponen ini berupa *tachometer* yang dipasang di ujung poros motor. DC *tachometer* pada dasarnya adalah sebuah generator kecil yang menghasilkan tegangan keluaran sebanding dengan kecepatan. Tegangan yang dihasilkan dibandingkan dengan tegangan perintah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Perbedaan tegangan kemudian digunakan untuk menjalankan motor untuk menghilangkan kesalahan[1].

2. Proses Milling

Milling adalah proses untuk memproduksi objek dari sebuah *solid material* menjadi bentuk dengan permukaan datar atau kompleks menggunakan pisau pahat dengan banyak gerigi. Pisau pahat berotasi untuk melakukan pemahatan (*feeding*) dan tersusun secara tegak lurus terhadap objek kerja dan permukaan mesin, umumnya pisau tersebut terletak pada bagian CNC yang disebut *spindle*. Setiap gerigi dari pisau pahat melakukan *feeding* pada *solid material*, sisa pemotongan tersebut menjadi bagian-bagian kecil disebut dengan gram (*chips*)[7].

Ada faktor yang mempengaruhi proses *milling* pada bahan jenis metal yaitu kecepatan rotasi *spindle*, kecepatan pemahatan/ pemakanan (*feeding*) dan kedalaman pemakanan (*depth of cut*). Faktor ini harus diperhatikan karena berpengaruh pada masa pakai pisau pahat, karena pisau pahat yang terbuat metal bergesekan dengan benda metal pula sehingga akan terjadi pengikisan mata pisau. Faktor tersebut juga berpengaruh pada hasil kerja yaitu pada kontur permukaan benda dan akurasi dimensi hasil kerja[7].

B. Identifikasi Metode Latzel[4]

Metode didekati dengan pendekatan sistem orde 2 dengan kemungkinan adanya *time delay*. Fungsi alih untuk metode Latzel diberikan pada persamaan 1.

$$G_L(s) = \frac{K}{(\tau_L s + 1)^n} \quad (1)$$

dan τ_L adalah konstanta waktu :

$$\tau_L = \alpha_{10} t_{10} + \alpha_{50} t_{50} + \alpha_{90} t_{90} \quad (2)$$

dengan t_{10} , t_{50} , dan t_{90} adalah waktu saat respon berada pada kondisi 10%, 50%, dan 90% dari keluaran *steady state* (Y_{ss}).

Untuk mendapatkan α_{10} , α_{50} , dan α_{90} terlebih dahulu dicari nilai parameter μ yang dirumuskan dengan :

$$\mu = \frac{t_{10}}{t_{90}} \quad (3)$$

Setelah diperoleh parameter μ , dapat diperoleh parameter μ_a dengan melakukan pendekatan nilai μ terhadap nilai μ_a . Nilai parameter μ_a ditunjukkan pada tabel 1. Dari nilai μ_a yang ada pada tabel, diperoleh orde n , dan parameter α_{10} , α_{50} , dan α_{90} [4].

Tabel 1. Parameter Untuk Metode Latzel

μ_a	n	α_{10}	α_{50}	α_{90}	μ_a	n	α_{10}	α_{50}	α_{90}
0,137	2	1,880	0,596	0,257	0,456	11	0,142	0,094	0,065
0,174	2,5	1,245	0,460	0,216	0,472	12	0,128	0,086	0,060
0,207	3	0,907	0,374	0,188	0,486	13	0,116	0,079	0,056
0,261	4	0,573	0,272	0,150	0,499	14	0,106	0,073	0,053
0,304	5	0,411	0,214	0,125	0,512	15	0,097	0,068	0,050
0,340	6	0,317	0,176	0,108	0,523	16	0,090	0,064	0,047
0,370	7	0,257	0,150	0,095	0,533	17	0,084	0,060	0,045
0,396	8	0,215	0,130	0,085	0,543	18	0,078	0,057	0,042
0,418	9	0,184	0,115	0,077	0,552	19	0,073	0,054	0,040
0,438	10	0,161	0,103	0,070	0,561	20	0,069	0,051	0,039

Setelah diperoleh parameter n , α_{10} , α_{50} , dan α_{90} , parameter τ_L dapat dihitung dan substitusikan hasilnya pada persamaan 1.

C. Integral Square Error (ISE)

Integral Square Error atau ISE digunakan untuk mengetahui kualitas sistem. Validasi ini diperlukan untuk mengetahui kualitas hasil pemodelan terhadap respon *plant* sebenarnya. Perhitungan untuk ISE dirumuskan pada Persamaan 4.

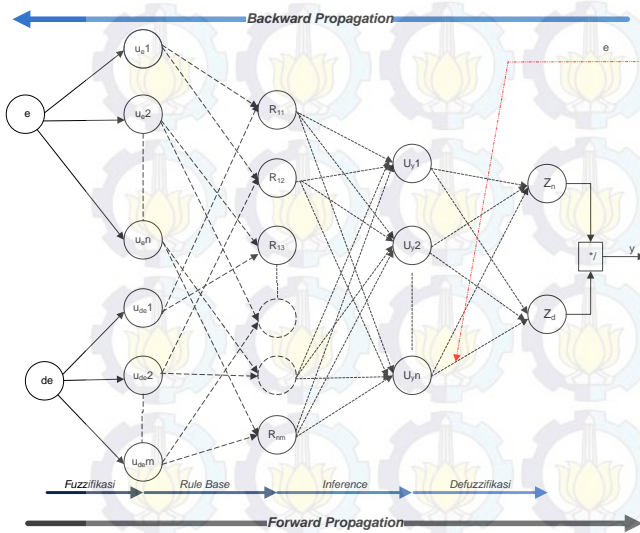
$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (4)$$

dimana e adalah hasil pengurangan dari data hasil pemodelan dan data hasil pengukuran terhadap waktu. Nilai e tersebut kemudian dikuadratkan dan dijumlahkan sesuai dengan banyaknya data terhadap waktu.

Hasil perhitungan ISE menunjukkan seberapa baik fungsi alih mempresentasikan respon hasil pengukuran. Semakin kecil nilai ISE, semakin baik fungsi alih yang dibuat[5].

D. Kontroler Neuro-Fuzzy

Kontroler *neuro fuzzy* merupakan sistem hibrida yang menggabungkan konsep logika *fuzzy* dengan jaringan syaraf tiruan (JST). Logika *fuzzy* memiliki kelebihan dalam pengambilan keputusan, sedangkan JST memiliki kelebihan dalam adaptasi melalui kemampuan pembelajaran yang dimilikinya. Pada kontroler *neuro fuzzy*, logika *fuzzy* akan direpresentasikan dalam yang memungkinkan terjadinya pembelajaran di dalamnya dan akan terjadi perubahan bobot untuk mengubah parameter pada logika *fuzzy*. Gambar 2 menunjukkan skema dari *neuro fuzzy*[8].

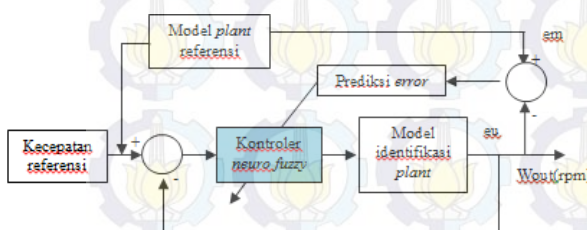


Gambar 2. Struktur Kontroler Neuro Fuzzy[8]

III. PERANCANGAN SISTEM KONTROL

A. Desain Sistem

Gambar 3 menunjukkan diagram blok keseluruhan dari pengaturan kecepatan motor *spindle* dengan menggunakan metode kontrol *neuro fuzzy*.



Gambar 3. Diagram Blok Sistem

Pada diagram blok menunjukkan bahwa sistem terdiri dari beberapa bagian atau subsistem. Bagian kecepatan referensi merupakan bagian untuk memasukkan kecepatan putaran motor yang diinginkan. Blok kontroler *neuro fuzzy* berisi struktur kontroler *neuro fuzzy*.

Blok model identifikasi *plant* berisi model matematis yang didapat dari identifikasi data *plant* kecepatan motor *spindle*. Blok prediksi *error* merupakan selisih dari *error* model dan *error plant* yang nantinya akan digunakan sebagai masukan kontroler *neuro fuzzy* untuk proses *learning* dan revisi bobot.

B. Identifikasi dan Validasi Sistem

Dari hasil identifikasi sistem didapatkan fungsi alih dari metode latzel seperti pada persamaan 5 dengan perhitungan ISE sebesar 3.301×10^6 .

$$G_L(s) = \frac{1.0386}{3,64351744s^2 + 3,8176s + 1} \quad (5)$$

C. Kontroler Neuro Fuzzy

1. Tahap Forward Propagation[8]

Pada tahap *Forward Propagation* dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai dari sinyal kontrol. Tahapan ini terdiri dari 5 lapisan yang setiap lapisan berisi proses perhitungan *fuzzy*.

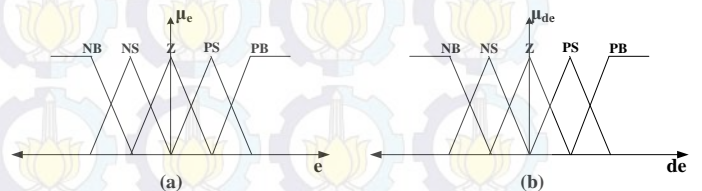
Lapisan 1 :

Lapisan pertama merupakan lapisan masukan dari *error* dan *delta error*, dengan nilai bobot 1. Hasil keluaran pada proses ini diperoleh dari Persamaan 6 dan akan menjadi masukan pada lapisan kedua yang akan melakukan proses *fuzzifikasi*.

$$O_{1,1} = e, O_{2,1} = de \quad (6)$$

Lapisan 2 :

Lapisan kedua terdiri dari 10 node yang merupakan proses *fuzzifikasi* dari *error* dan *delta error*. Fungsi keanggotaan yang digunakan yaitu fungsi segitiga dengan 5 himpunan pendukung untuk *error* dan *delta error*. Gambar 4 menunjukkan fungsi keanggotaan dari *error* dan *delta error*.



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan : (a) *error*; (b) *delta error*

Keluaran dari lapisan ini diperoleh dari Persamaan 7, dengan nilai n dan m sama dengan 5 karena setiap masukan yaitu *error* dan *delta error* mempunyai 5 himpunan pendukung.

$$x_{i,2} = \begin{cases} O_{1,1} & ; \text{untuk } i=1,2,\dots,n \\ O_{2,1} & ; \text{untuk } i=1,2,\dots,m \end{cases}$$

$$O_{i,2} = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x_{i,2}-a}{b-a} & a < x < b \\ \frac{b-a}{c-x_{i,2}} & b < x < c \\ 0 & x < c \end{cases} ; \text{ untuk } i = 1,2,\dots,n+m \quad (7)$$

Lapisan 3 :

Lapisan ketiga merupakan lapisan basis aturan dengan menggunakan tabel Mack Vicar Wheelan seperti Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Basis Aturan Mack Vicar Wheelan

	u_{e1}	u_{e2}	u_{e3}	u_{e4}	u_{e5}
u_{de1}	NB	NB	NS	NS	Z
u_{de2}	NB	NS	NS	Z	PS
u_{de3}	NS	NS	Z	PS	PS
u_{de4}	NS	Z	PS	PS	PB
u_{de5}	Z	PS	PS	PB	PB

Dengan memasukkan dari fungsi keanggotan *error* dan *delta error* diperoleh nilai dari basis aturan. Basis aturan ini menggunakan operasi seperti pada Persamaan 8 karena menggunakan struktur *neuro fuzzy* Mamdani.

$$R_{i,3} = O_{n,2} \times O_{m,2} ; \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, n \times m \quad (8)$$

Lapisan 4 :

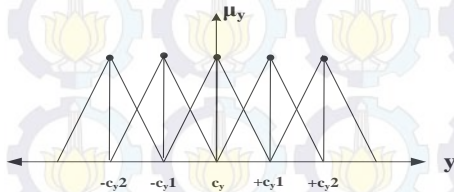
Hasil dari basis aturan kemudian dihitung dalam operasi inferensi pada lapisan keempat. Operasi yang digunakan seperti pada Persamaan 9 dan Persamaan 10, sehingga bobot pada lapisan ini bernilai 1 karena pada proses *backward* nanti tidak dilakukan proses revisi pada operasi inferensi ini.

$$r_{i,4} = \sum_{j=1}^{n \times m} w_{ij} R_{(j,3)} ; \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, n \times m \quad (9)$$

$$O_{i,4} = \sum_{i=1}^n r_{i,4} ; \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Lapisan 5 :

Proses *defuzzifikasi* pada lapisan ini menggunakan fungsi *singleton* seperti Gambar 5.

**Gambar 5.** Fungsi *Singleton* Sinyal Keluaran

Proses perhitungan dilakukan dengan Persamaan 11 dengan nilai bobot berupa nilai tengah dari fungsi. Nilai tengah ini nanti yang akan direvisi nilainya supaya sinyal keluaran atau sinyal kontrol dapat sesuai dengan yang dibutuhkan *plant*.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times U_{y_i}}{\sum_{i=1}^n U_{y_i}} \quad (11)$$

2. Tahap Backward Propagation[8]

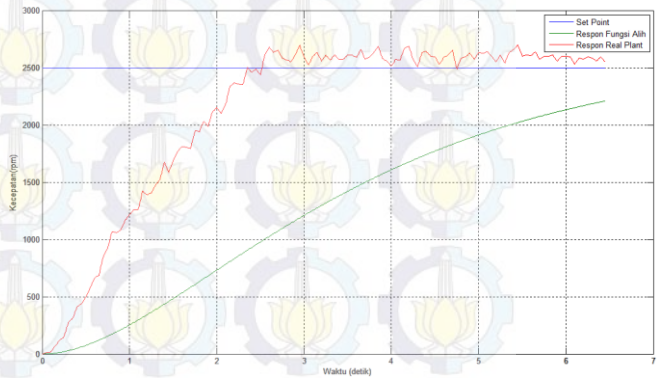
Pada tugas akhir ini, struktur *neuro fuzzy* yang digunakan ialah struktur *neuro fuzzy* Mamdani sehingga proses *backward* atau proses revisi bobot hanya dilakukan pada lapisan kelima yaitu lapisan *defuzzifikasi* untuk menghasilkan sinyal kontrol. Revisi bobot berupa revisi nilai tengah dari fungsi keanggotaan fungsi sinyal kontrol. Untuk menghitung bobot atau nilai tengah baru digunakan Persamaan 12.

$$c_y^B(i) = c_y^L(i) + \alpha \times e_{num} \times 1 \times U_y(i) \quad (12)$$

IV. HASIL DAN PENGUJIAN

A. Pengujian Fungsi Alih Hasil Identifikasi

Pengujian fungsi alih yang sudah diperoleh dari hasil identifikasi, digunakan untuk mengetahui perbandingan antara respon hasil simulasi fungsi alih dan respon hasil pengukuran *plant*. Gambar 6 menunjukkan perbandingan antara respon hasil pengukuran *plant* dengan respon fungsi alih.

**Gambar 6** Perbandingan Respon Real Plant dengan (2. Respon Fungsi Alih

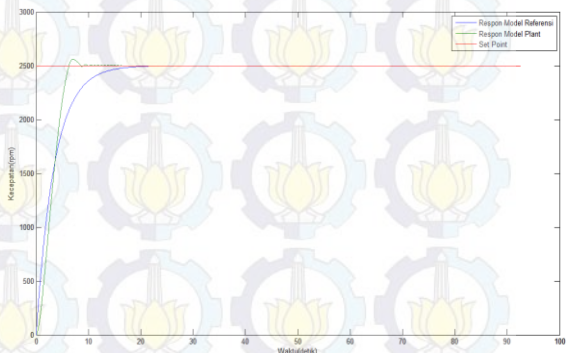
Dari Gambar 6 diketahui, respon *plant* dengan sistem *open loop* atau tanpa kontroler, respon yang dihasilkan melebihi dari nilai referensi yang telah ditentukan dan mencapai nilai *steady state* sebesar 2597 rpm membutuhkan waktu 9.137 detik. Dengan kondisi tersebut sehingga diperlukan kontroler untuk memberikan aksi kontrol sehingga respon *plant* mencapai *steady state* di nilai referensi yang telah ditentukan.

B. Simulasi Pengujian Kontroler

Pada pengujian dengan kontroler, rancangan akan disimulasikan ketika terjadi perubahan referensi dan saat perubahan beban untuk mengetahui karakteristik kontroler.

1. Pengujian Tanpa Pembebanan

Pengujian ini dilakukan untuk melihat perbandingan *settling time* (t_s) dan *rise time* (t_r) dari respon *plant* ketika menggunakan kontroler *neuro fuzzy* saat tanpa pembebanan.

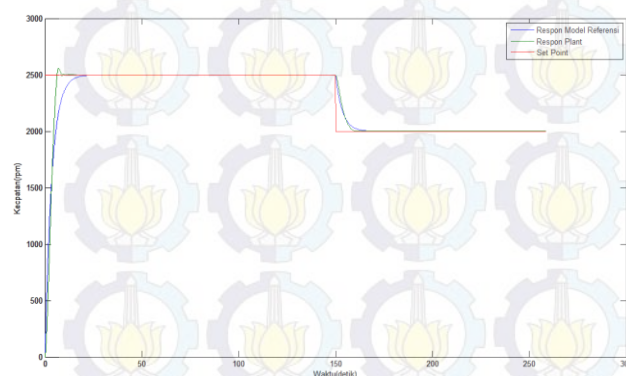
**Gambar 7.** Respon Plant dengan Kontroler *Neuro Fuzzy*

Ketika *plant* menggunakan kontroler *neuro fuzzy*, seperti pada Gambar 7, terlihat bahwa respon lebih cepat dan dapat mencapai seperti respon yang diinginkan. Hasil respon juga dapat dilihat untuk mencapai *steady state* membutuhkan waktu (t_s) sebesar 5,68 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 5% hingga 95% dari nilai *steady state* (*rise time*) adalah sebesar 6,29 detik.

2. Pengujian Dengan Perubahan Nilai Referensi

Dalam proses *feeding*, terkadang terjadi perubahan referensi sewaktu-waktu. Ketika nilai referensi kecepatan berubah, respon juga harus dapat mengikuti dan *steady state* pada nilai referensi baru yang telah ditetapkan.

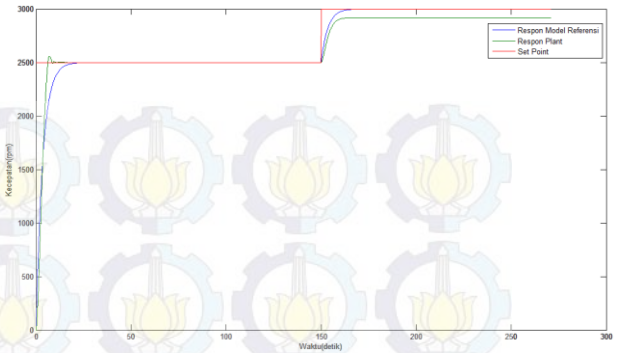
Pengujian pertama dilakukan dengan mengubah nilai referensi dari 2500 rpm ke 2000 rpm, hasil respon dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Respon Plant dengan Perubahan Nilai Referensi dari 2500 rpm ke 2000 rpm

Dari kecepatan referensi 2500 rpm menjadi 2000 rpm, terlihat bahwa kontroler dapat bekerja memberikan aksi kontrol untuk dapat menjaga respon *plant* dapat kembali *steady state* disekitar nilai referensi yang telah ditentukan yaitu sebesar 2000 rpm. Respon ketika diberi kontroler membutuhkan waktu untuk mencapai *steady state* adalah sebesar 4,71 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai 5% sampai 95% (*rise time*) adalah sebesar 5,17 detik. Selain itu respon dapat mencapai sesuai dengan model referensi.

Perubahan nilai referensi selanjutnya dilakukan pula dengan cara menaikkan nilai referensi dari 2500 rpm ke 3000 rpm, hasil respon dari perubahan referensi dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Respon Plant dengan Perubahan Nilai Referensi dari 2500 rpm ke 3000 rpm

Ketika kecepatan referensi dinaikkan dari 2500 rpm mencapai 3000 rpm, terlihat bahwa kontroler dapat bekerja memberikan aksi kontrol untuk dapat menjaga respon *plant* dapat kembali *steady state* disekitar nilai referensi yang telah ditentukan yaitu sebesar 3000 rpm. Respon ketika diberi kontroler membutuhkan waktu untuk mencapai *steady state* adalah sebesar 6,3 detik. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai 5% sampai 95% (*rise time*) adalah sebesar 6,92 detik. Selain itu respon dapat mencapai sesuai dengan model referensi.

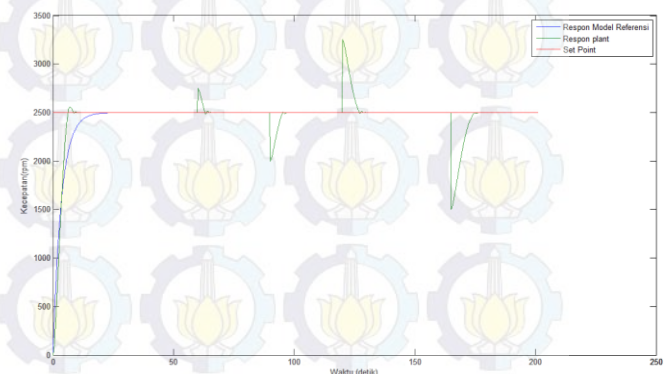
Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3 yaitu tabel spesifikasi ketika kecepatan referensi diturunkan menjadi 2000 rpm dan dinaikkan menjadi 3000 rpm.

Tabel 4.2 Spesifikasi Pengujian dengan Pengubahan Nilai Referensi

Spesifikasi	Kecepatan ref. 2500 rpm	Kecepatan ref. 2500 menjadi 2000 rpm	Kecepatan ref. 2500 menjadi 3000 rpm
$t_s(5\%)$	5,68 detik	4,71 detik	6,32 detik
$t_r(5\%-95\%)$	6,29 detik	5,17 detik	6,92 detik
t_d	2,91 detik	2,48 detik	3,28 detik
%ess	0,08 %	0,1 %	0,03 %

3. Pengujian Dengan Perubahan Beban

Pengujian juga dilakukan ketika terjadi pembebanan, hasil respon dapat terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Respon Plant Dengan Beban

Ketika *plant* diberi pembebanan, dengan kontroler *neuro fuzzy* terlihat bahwa respon *plant* dapat menyesuaikan kecepatan referensi dan model referensi dengan membutuhkan waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 5,71 detik dan *rise time* sebesar 6,27 detik.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi diperoleh bahwa dengan kontroler *neuro fuzzy* pada pengaturan kecepatan motor *spindle* mesin CNC, kontroler dapat mengikuti kecepatan referensi dengan beberapa kondisi pengujian dan juga respon yang dibutuhkan *plant* untuk mencapai keadaan *steady state* lebih cepat 3,45 detik dibandingkan tanpa menggunakan kotroler.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] _____, "Modul Pelatihan Teknologi CNC", PT.CNC Indonesia.
- [2] Setyaningrum, Dinar. "Desain dan Implementasi Model Reference Adaptive Control untuk Pengaturan Tracking Optimal Motor DC". Tugas Akhir Elektro-ITS.2012.
- [3] Gamayanti, Nurlita. "Karakteristik Sistem Orde Pertama" Handout Mata Kuliah Dasar Sistem Pengaturan. Teknik Elektro-ITS Surabaya.
- [4] Jakoubek, Ing.Pavel. "Eksperimental Identification of Stabile Nonoscillatory System from Step-Responses by Selected Methods".2009.
- [5] Putri, Nindita Suryadita. "Pengaturan Proses *Face Milling* Pada Mesin *Computer Numerical Control* (CNC) Dengan Kontroler *Fuzzy PID*". Tugas Akhir Elektro-ITS. 2013.
- [6] Kusumadewi, Sri, Hartati, Sri. "*Neuro Fuzzy*: Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf". Graha Ilmu.Yogyakarta. 2010.
- [7] Fikri, Rijalul. "Perancangan Kontroler *Fuzzy Gain Scheduling* Untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Pada *Spindle CNC Milling*". Tugas Akhir Elektro-ITS.2015
- [8] Yusuf, Yani Ikhsan. "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan *Direct Torque Control* Berbasis *Neuro Fuzzy*". Tugas Akhir Elektro-ITS. 2015.